System Engineering and Productivity/ 2025/ Vol.5/ No.3/ 155-177

System Engineering and Productivity

DOI: 10.22034/sep.2025.2063146.1332

Analysis of Key Trends in Iran's Steel Production Chain: A Systematic Exploration of Emerging Trends

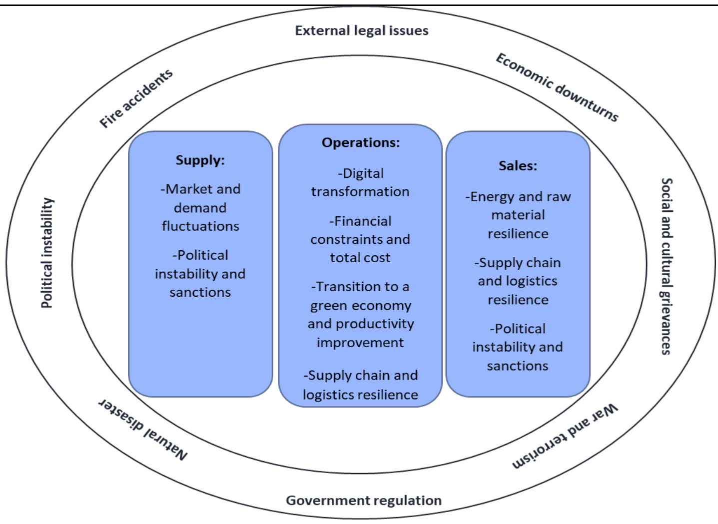
Mozhgan Abdollahi [1*], Ali Mohammad Ahmadvand [2], Farzaneh Mirshahvelayati [3]

[1] Ph.D. Student, Faculty of Industrial Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran
[2] Professor, Faculty of Industrial Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran
[3] Assistant professor, Institute for Humanities and Cultural Studies, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- Supply: The greatest vulnerability is due to the risk of energy outages, raw material shortages, and sanctions.
- Operations: The transition to digital and green technologies, cost management, and human capital enhancement play a decisive role in the competitiveness and sustainability of production.
- Sales: Global market fluctuations, changing demand, and export restrictions are the dominant trends, the intelligent management of which will ensure marketability and foreign exchange earnings.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 9 June 2025
Revised: 29 June 2025
Accepted: 7 July 2025
Available online: 7 July 2025

*Correspondence:
m.abdollahi07@eyc.ac.ir

How to cite this article:
Abdollahi, M., Ahmadvand, A, M. & Mirshahvelayati, F. (2025). Analysis of key trends in Iran's steel production chain: a systematic exploration of emerging trends. *System Engineering and Productivity*, 5(3), 155-177.

Keywords:
Trend
Steel
Value Chain
Future
Green Industry

ABSTRACT

The increasing growth and uncontrollable interconnection of changes in today's world compel organizations and societies to think intelligently about various images and alternatives of possible and desirable futures and to actively engage in shaping the best outcomes. This imperative is particularly critical in strategic industries such as steel. One of the fundamental prerequisites of foresight is identifying the most significant macro-trends and assessing their potential interactions. Accordingly, the present study aims to identify the key influencing factors on the production chain in Iran's steel industry and the critical trends affecting its future over a five-year horizon. This was achieved through a systematic review of credible and relevant documents, categorizing them within an analytical model, and ultimately identifying eight major impactful trends. A notably important finding of this research is the increasing significance of environmental considerations. The study further examines the reasons these trends influence steel production and the downstream value chain, concluding with policy recommendations related to these issues.

1. Introduction

The steel industry is a strategic pillar of support for national economies, not only producing a crucial industrial product but also a prime indicator of sustainable development and economic well-being. The growth in steel production globally has a satisfactory correlation (r = 0.78) with economic growth in developing countries (OECD, 2022). For Iran, the sector accounts for about 18 % of industrial added value and 3.2 % of total GDP, while remaining about 85 % self-sufficient in crude steel (Azizi & Karimi, 2019).

Besides economic measures, the industry plays a crucial role in national security and job creation supporting more than 60,000 direct and 300,000 indirect jobs and assisting in improving socio economic performance in less developed regions (International Labour Organization, 2023). Nevertheless, it is forced to work within a plagued global as well as local environment because of technological transformation, market volatility, environmental constraints, and geopolitical tensions (Hassanzadeh, 2021).

Environmental concerns such as high water and fossil fuel consumption, carbon footprint, and corresponding ecosystem impacts are driving pressures for decarbonization and sustainable production (Wang et al., 2021). All these have contributed to the necessity of large-scale foresight analyses to chart macro trends and uncertainties guiding Iran's integrated steel value chain so that policymakers and business leaders can anticipate disruptive forces and implement resilient long-term strategies (Ghasemi & Ghiasi, 2024).

2. Methodology

A systematic mixed method approach, grounded in meta synthesis principles, was adopted to identify and analyze prevailing trends informing Iran's steel value chain. Utilizing Nikseirateh et al. (2023) systematic review protocol and seven step meta synthesis model by Sandelowski & Barroso (2013), the study synthesized and interpreted evidence from multi-nodal qualitative and quantitative literature to ensure transparency, validity, and replicability.

A systematic search strategy was used on global databases (Web of Science, Scopus, ScienceDirect), industrial databases (World Steel Association, Ministry of Industry, Mine and Trade, OECD reports), national repositories (ISC, MagIran), and grey literature (company reports, customs and statistical information) from 1975 to 2023. The inclusion criteria were formal publication, availability of the full text, methodological quality, and direct relevance to Iran's steel industry or comparable economies. Screening was a two-step process title/abstract and full text review and followed by dual reviewer quality appraisal using CASP (qualitative) and JBI (quantitative) checklists. Excluded were those with less than 7/10.

230 high quality sources (150 journal articles, 50 industrial reports, 30 policy documents) remained out of 1,200 original records. Key variables were extracted and coded under the STEEPV dimensions (20 economic, 15 technological, 5 social, 6 environmental, 7 political, 5 values). Duplicate and overlapping variables were merged through comparative analysis and expert consensus. Inter coder reliability, assessed via Holsti's coefficient, reached 0.83 exceeding the 0.70 threshold. The classified drivers were condensed into integrated macro trends and prioritized by possible influence and future uncertainty, producing eight strategic trends that constitute the study's findings and discussion.

3. Results and Discussion

The STEEPV based systematic assessment revealed eight strategic trends that affect Iran's steel production chain's future for the 2024–2029 period. The trends exhibit diverse influences—positive, negative, or dual upon the industry's sustainability and competitiveness. Positive trends include the establishment of a green economy, digitalization and establishment of Industry 4.0, resilience in the supply chain, and human capital development. They will lower costs, enhance productivity, and diversify products and thereby make Iran more competitive in local as well as international markets. Negative trends are repeated shortages of raw materials and energy, rising production costs, political unrest, sanctions, and market volatility. These factors threaten continuity of production and profitability and require targeted policy measures to guarantee energy resources, stabilize raw material supply, and increase overall efficiency. Dual effect patterns, including volatilities in market demand, create both opportunities for export led growth and vulnerability to threats from price volatility and protectionist trade policies at the same time. Addressing such challenges calls for flexible production planning, diversified markets, and effective risk management systems.

Figure 1 depicts the alignment of these trends across the steel supply chain and key intervention points. Contrast with previous global studies (e.g., Wang et al., 2021; OECD, 2023) confirms the global relevance of issues such as energy security, environmental compliance, and technology

innovation, yet asserts that their intensity and urgency are increased by the Iranian context.

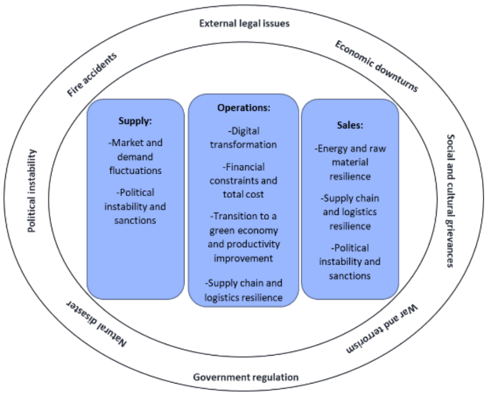


Figure 1. Drivers of the steel supply chain, from Dong et al. (2023)

4. Conclusions

This study has identified eight strategic trends that are expected to impact Iran's steel production value chain between 2024 and 2029 on the basis of STEEPV framework and expert opinion. Results show that drivers such as transition to a green economy, digitalization, enhanced supply chain resilience, and human capital building have strengthened the productivity and competitiveness horizons of the industry at the global level. Conversely, long-term restraints like energy and raw material shortages, rising costs, and geopolitical conflicts continue to threaten the continuity of production while volatility of market demand is a double-edged factor.

By linking these results with global evidence, the results evidently answer the research queries outlined in the introduction and explain the strategic imperatives of the industry: secure energy sources, propel technology leap, meet environmental standards, and secure market diversification. Collectively, these results establish a solid ground for subsequent research to develop scenario-based policy frameworks and determine green and digital transformation policies' effectiveness in Iran's steel sector and in similar strategic sectors.

Funding

This research received no external funding.

Author contributions

All authors have had equal roles and contributions to the article.

Conflicts of interest

There are no conflicts of interest associated with this research.

Acknowledgments

We are grateful to all colleagues who provided insights and expertise that greatly assisted this research. We also thank the anonymous reviewers for their valuable suggestions to improve the paper.

References

Azizi, M., & Karimi, A. (2019). The strategic role of steel industry in Iran’s economic resilience. *Journal of Middle Eastern Economics, 15*(3), 112–130. https://doi.org/10.1086/705432

Ghasemi, M., & Ghiasi, M. (2024). Evaluation and forecasting of technology development in smartwatches using TFDEA. *System Engineering and Productivity, 4*(4), 1–12. https://doi.org/10.22034/sep.2024.2023670.1188 (In Persian)

Hassanzadeh, E. (2021). Sanctions and industrial development: Case study of Iran’s steel sector. *Third World Quarterly, 42*(5), 987–1005. https://doi.org/10.1080/01436597.2021.1891024

International Labour Organization. (2023). *Labour migration in Asia: Trends and policies 2023*. International Labour Organization.

Niksirat, M., Tayyebi, J., & Izadkhah, M. M. (2023). A comprehensive systematic review to extract factors affecting students’ academic achievement. *System Engineering and Productivity,* 3(3), 112–134. https://doi.org/10.22034/msb.2023.711492 (In Persian)

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2022). *Steel market developments 2022*.

Sandelowski, M., & Barroso, J. (2013). *Handbook for synthesizing qualitative research*. Springer Publishing Company.

Wang, P., Ryberg, M., Yang, Y., Feng, K., Kara, S., Hauschild, M., & Chen, W.-Q. (2021). Efficiency stagnation in global steel production urges joint supply- and demand-side mitigation efforts. *Nature Communications, 12*(1), Article 2066. https://doi.org/10.1038/s41467-021-22245-6

مهندسی سیستم و بهره‌وری/ سال ۱۴۰۴/ دوره ۵/ شماره ۳/ صفحه ۱۵۵-۱۷۷

نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری

DOI: 10.22034/sep.2025.2063146.1332

تحلیل روندهای کلیدی در زنجیره تولید فولاد ایران: کاوشی نظام‌مند در روندهای پیش‌رو

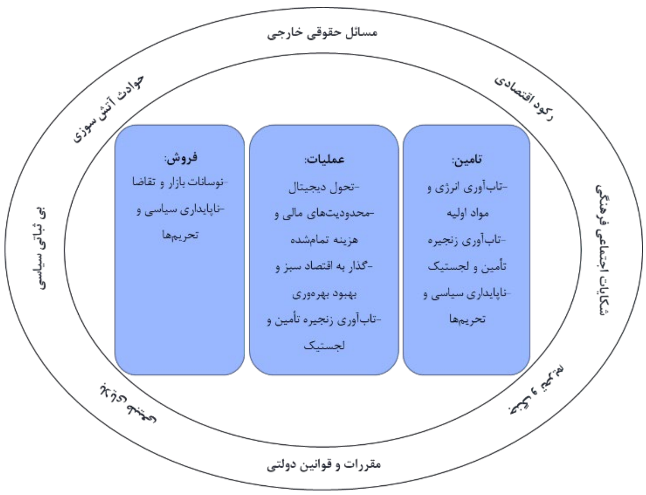
مژگان عبداللهی[۱]، علی محمد احمدوند[۲]*، فرزانه میرشاه‌ولایتی[۳]

[۱] دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران

[۲] استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران

[۳] استادیار، پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی، تهران، ایران

چکیده گرافیکی



برجسته‌ها

- تأمین: بیش‌ترین آسیب‌پذیری ناشی از ریسک قطع انرژی، کمبود مواد اولیه و تحریم‌هاست.
- عملیات: گذار به فناوری‌های دیجیتال و سبز، مدیریت هزینه‌ها و ارتقاء سرمایه انسانی نقشی تعیین‌کننده در رقابت‌پذیری و پایداری تولید دارد.
- فروش: نوسانات بازار جهانی، تغییر تقاضا و محدودیت‌های صادراتی روندهای غالب‌اند که مدیریت هوشمندانه آن‌ها، بازارپذیری و ارزآوری را تضمین خواهد کرد.

چکیده

رشد سریع و درهم‌تنیدگیِ غیرقابل‌کنترل تغییرات در دنیای امروز، سازمان‌ها و جوامع را ناگزیر می‌کند تا هوشمندانه به ترسیم تصاویر و سناریوهای مختلف از آینده‌های محتمل و مطلوب بپردازند و فعالانه در جهت تحقق بهترین نتایج گام بردارند. اهمیت این موضوع در صنایع راهبردی همچون صنعت فولاد دوچندان است، زیرا این صنعت نقشی حیاتی در اقتصاد و توسعه کشورها دارد. یکی از پیش‌شرط‌های اساسی آینده‌نگری، شناسایی مهم‌ترین روندهای کلان ۲۱ تأثیرگذار و ارزیابی تعاملات احتمالی آن‌هاست. در این پژوهش، به‌منظور شناسایی عوامل کلیدی مؤثر بر زنجیره تولید صنعت فولاد ایران و روندهای اصلی شکل‌دهنده آینده این صنعت در افق پنجساله، ابتدا مرور نظام‌مندی بر اسناد معتبر و مرتبط انجام گردید و داده‌ها در قالب یک مدل تحلیلی دسته‌بندی شدند. درنهایت، هشت روند تأثیرگذار اصلی شناسایی شد که در میان آن‌ها، افزایش اهمیت مباحث زیست‌محیطی - به‌ویژه در زمینه پایداری و کاهش آلایندگی - برجسته‌تر بود .سپس، دلایل تأثیرگذاری این روندها بر تولید فولاد و زنجیره ارزش پایین‌دست بررسی شد. در پایان، توصیه‌های سیاستی مرتبط برای مواجهه با چالش‌ها و بهره‌برداری از فرصت‌ها ارائه گردید. این مطالعه، دیدگاه‌های ارزشمندی برای ذی‌نفعان صنعت فولاد به‌منظور برنامه‌ریزی استراتژیک و حرکت به سمت صنعتی سبز و پایدار فراهم می‌آورد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶

ارائه برخط: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶

*نویسنده مسئول:

m.abdollahi07@eyc.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

روند

فولاد

زنجیره ارزش

آینده

صنعت سبز

۱- مقدمه

در دنیای امروز، همزمان با پیدایش و توسعه فناوری‌های جدید از یک‌سو و افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی از سوی دیگر، صنایع و سازمان‌ها با چالش‌ها و فرصت‌های متعددی روبه‌رو شده‌اند. این تغییرات می‌توانند تأثیرات عمیقی بر مدل‌های کسب‌وکار، رفتار تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان و روندهای بازار داشته باشند (Ghasemi & Ghiasi, 2024). دانش آینده‌پژوهی این امکان را به صنایع می‌دهد تا به‌طور نظام‌مند و استراتژیک به پیش‌بینی و مدیریت این تغییرات بپردازند (Farzami et al, 2016). در این میان، صنایع بزرگ و راهبردی در سطوح ملی و بین‌المللی، مانند صنعت آهن و فولاد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند؛ زیرا این صنعت علاوه بر تأثیر مستقیم بر زنجیره پایین‌دست خود، بر سایر صنایع نیز تأثیر بسزایی دارد (Majlis Research Center, 2020).

مطالعات سازمان همکاری و توسعه اقتصادی[1] (OECD, 2022) نشان می‌دهد که رشد تولید فولاد با ضریب همبستگی ۰/۷۸ با رشد اقتصادی کشورهای درحال‌توسعه همراه است. در ایران، این صنعت ۱۸ درصد از ارزش‌افزوده بخش صنعت و ۲/۳ درصد از تولید ناخالص داخلی را به خود اختصاص داده است (Statistical Center of Iran, 2023). این آمارها حاکی از آن است که فولاد نه‌تنها کالایی صنعتی، بلکه شاخصی کلیدی برای سنجش توسعه‌یافتگی اقتصادی محسوب می‌شود (Smil, 2016).

خودکفایی ۸۵ درصدی ایران در تولید فولاد خام (World Steel Association, 2023) و تأمین ۹۵ درصدی نیازهای دفاعی کشور از تولیدات داخلی (Azizi & Karimi, 2019)، نشانگر اهمیت راهبردی این صنعت در کاهش وابستگی به واردات است. این خوداتکایی، به‌ویژه در شرایط تحریم‌های بین‌المللی، عاملی کلیدی برای حفظ ثبات صنعتی کشور به شمار می‌رود (Hassanzadeh, 2021).

صنعت فولاد به‌عنوان منبعی برای تأمین نیازهای حیاتی جامعه، ایجاد فرصت‌های شغلی گسترده مستقیم و غیرمستقیم و بهبود معیشت افراد نیز نقش مهمی ایفا می‌کند (International Labour Organization, 2022).

در بعد اجتماعی و منطقه‌ای، پژوهش‌های برنامه توسعه ملل متحد (United Nations Development Programme, 2021) نشان می‌دهد استقرار مجتمع‌های فولادی در مناطق کمتر توسعه‌یافته مانند خوزستان، به رشد ۱۲ درصدی شاخص‌های توسعه انسانی در این مناطق منجر شده است. این صنعت در ایران مستقیماً برای ۶۰ هزار نفر اشتغال ایجاد کرده و به‌طور غیرمستقیم بیش از ۳۰۰ هزار شغل دارد (International Labour Organization, 2023). به‌عنوان‌مثال، شهرستان بافق استان یزد که میزبان مجتمع فولاد یزد است، بین سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ شاهد افزایش ۴۰ درصدی نرخ ثبت‌نام در مدارس و ۲۵ درصدی دسترسی به خدمات بهداشتی بوده است (United Nations Development Programme, 2021).

در سطح بین‌المللی، صادرات فولاد ایران به ۴۰ کشور جهان، سالانه بیش از ۸ میلیارد دلار ارزآوری دارد (Iran Customs Administration, 2023). توسعه زنجیره پایین‌دست فولاد در ایران منجر به تولید محصولات متنوع باکیفیت بالا و جلوگیری از خام‌فروشی سنگ‌آهن شده است. این موفقیت‌ها در حالی حاصل‌شده که صنعت فولاد ایران با چالش‌های فناورانه ناشی از تحریم‌ها مواجه است. گزارش آژانس بین‌المللی انرژی (International Energy Agency, 2023) نشان می‌دهد ایران برای دست‌یابی به فناوری‌های نوینی همچون احیای مستقیم با هیدروژن، با محدودیت‌های قابل‌توجهی روبه‌روست. همچنین، مصرف انرژی این صنعت معادل ۹ درصد از کل مصرف انرژی صنعتی کشور است (Iran Energy Efficiency Organization, 2022) که ضرورت حرکت به سمت تولید پایدار و جایگزینی سوخت‌های فسیلی را آشکار می‌سازد (United Nations Industrial Development Organization, 2022).

از سوی دیگر، اکتشاف، استخراج و بهره‌برداری از معادن روباز و زیرزمینی و همچنین احداث و راه‌اندازی کارخانه‌های معدنی و فولادی، تأثیرات قابل‌توجهی بر زیست‌بوم گیاهی و جانوری داشته است. این موضوع توسعه صنعت را در سال‌های آتی با چالش‌هایی مواجه خواهد کرد. طی سالیان گذشته، توسعه پایدار به‌عنوان یک موضوع کلیدی مطرح‌شده و اجرای سیاست‌های

[1] Organization for Economic Co-operation and Development

مرتبط با آن برای تمامی کشورها ضروری است (World Steel Association, 2022).

مسائل زیست‌محیطی، به‌ویژه در حوزه مصرف آب و انرژی، تأثیر عمیقی بر روندهای تولید فولاد در ایران و جهان داشته است (Wang et al, 2021). این صنعت به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین بخش‌ها در آب (برای خنک‌سازی و فرآیندهای تولید) و انرژی (عمدتاً سوخت‌های فسیلی)، با چالش‌های جدی مانند کم‌آبی، آلودگی منابع آبی و انتشار گازهای گلخانه‌ای روبه‌روست. در سطح بین‌المللی، افزایش محدودیت‌های تولید انرژی از سوخت‌های فسیلی و کمبود منابع آبی، تولیدکنندگان را به سمت فناوری‌های کم‌آب (مانند سیستم‌های بازیافت آب) و انرژی‌های تجدیدپذیر (مانند هیدروژن سبز) سوق داده است (Zhang & Fang, 2023). در ایران نیز، با وجود محدودیت‌های آبی و وابستگی شدید به سوخت‌های فسیلی، حرکت به سمت بهینه‌سازی مصرف آب (با استفاده از مدارهای بسته) و کاهش شدت انرژی (از طریق نوسازی فناوری‌ها) در حال تبدیل‌شدن به یک ضرورت است. این تحولات نه‌تنها هزینه‌های تولید را تحت تأثیر قرار داده، بلکه پایداری زیست‌محیطی را به معیاری کلیدی در رقابت‌پذیری صنعت فولاد تبدیل کرده است (Ahmadi & Jahanbakhshi, 2023). پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۴۰ حدود ۶۰ درصد تولید جهانی فولاد مبتنی بر هیدروژن سبز خواهد بود (OECD, 2023)، درحالی‌که سهم فناوری‌های کم‌کربن در ایران فعلاً به ۱۵ درصد محدود است (World Bank, 2022). این شکاف فناورانه، نیاز به سرمایه‌گذاری سالانه حداقل ۱.۲ میلیارد دلار در پژوهش‌های کاربردی را ضروری می‌سازد (McKinsey & Company, 2022).

با توجه به موارد فوق، ضروری است با در نظر گرفتن ملاحظات دقیق و شناسایی عدم‌قطعیت‌ها و ریسک‌های مؤثر بر این صنعت، ضمن ترسیم آینده‌های بدیل، بهترین راهبردها را برای هر یک از آینده‌های محتمل تدارک دید. روندپژوهی نیز با تحلیل داده‌های تاریخی، تصویری واقع‌بینانه از جایگاه ایران در بازارهای جهانی ارائه می‌دهد. اگرچه ایران با صادرات ۱۰/۴ میلیون تن فولاد در سال ۲۰۲۲ (Iran Customs Administration, 2023) به‌عنوان دومین صادرکننده خاورمیانه شناخته می‌شود، تحریم‌ها و عدم تطابق با استانداردهای زیست‌محیطی اتحادیه اروپا، هزینه مبادلات را تا ۳۰ درصد افزایش داده است (Hassanzadeh, 2021). این واقعیت‌ها نشان می‌دهند تداوم روندهای فعلی بدون اتخاذ راهبردهای آینده‌نگرانه، می‌تواند سهم بازار ایران را تا سال ۲۰۳۰ تا ۳۵ درصد کاهش دهد (United Nations Development Programme, 2021).

کاربرد عملی این رویکردها در صنعت فولاد ایران را می‌توان در سند تحول صنعت فولاد مشاهده کرد که هدف افزایش تولید به ۵۵ میلیون تن با تمرکز بر فناوری‌های پاک و کاهش ۲۰ درصدی شدت انرژی تا افق ۱۴۰۴ را دنبال می‌کند (Ministry of Industry, Mine and Trade, 2023). تحقق این اهداف مستلزم ادغام روش‌هایی مانند سناریوسازی و تحلیل روندها در فرآیندهای تصمیم‌گیری است. برای نمونه، توسعه هیدروژن آبی با استفاده از گاز طبیعی می‌تواند همزمان با کاهش ۴۰ درصدی انتشار کربن، هزینه تولید را نسبت به هیدروژن سبز تا ۲۵ درصد کاهش دهد (International Centre for Trade and Sustainable Development, 2023).

در سال‌های آتی، فولاد و صنایع وابسته، علیرغم همه ظرفیت‌ها، با چالش‌های متعددی روبه‌رو خواهد شد. با توجه به الزام اجرای سیاست‌های توسعه پایدار، افزایش تولید فولاد تنها با رعایت ملاحظات خاص فناورانه، زیست‌محیطی و اجتماعی امکان‌پذیر است. چالش‌های مرتبط با این افزایش تولید به شرح زیر است (Majlis Research Center, 2022):

۱) محدودیت‌های تأمین انرژی و افزایش قیمت حامل‌های انرژی
۲) چالش‌های فناورانه در بهره‌وری انرژی و کاهش انتشار کربن (Safaie et al., 2024)
۳) کمبود سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک
۴) تنش‌های اجتماعی ناشی از آلایندگی واحدهای تولیدی
۵) رقابت با تولیدکنندگان بین‌المللی در زمینه استانداردهای زیست‌محیطی (Iranian Mines and Mining Industries Development and Renovation Organization, 2023)

با این توصیف، شناخت آینده تولید فولاد - با توجه به کاربردهای وسیع آن، تغییرات گسترده ناشی از آن و چالش‌هایی مانند حمل‌ونقل ریلی، تأمین آب، اکتشاف و

تأمین مواد اولیه، بهره‌گیری از تکنولوژی روز، نوسازی خطوط تولید، قیمت‌گذاری و تأمین انرژی - امری ضروری به‌نظر می‌رسد (Iranian Steel Research Center, 2023).

برای شناسایی منسجم و نظام‌مند این تغییرات، به ابزاری نیاز است که امکان بررسی سازمان‌یافته تغییرات آینده را فراهم کند؛ این ابزار همان سناریونویسی است (Abbaszadeh et al, 2013)؛ بنابراین، هدف این پژوهش ترسیم نقشه راه توسعه این صنعت راهبردی، مبتنی بر مرور نظام‌مند اسناد و شناسایی روندهای کلیدی از طریق پاسخگویی به سؤالات اساسی زیر است:

۱) مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر تولید در صنعت فولاد ایران کدام‌اند؟

۲) روندهای کلیدی مؤثر بر آینده صنعت فولاد ایران در افق پنجساله کدام‌اند؟

۳) نقطه اثر هریک از این روندها بر کدام قسمت از زنجیره تأمین صنعت فولاد است؟

۲- پیشینه پژوهش

۲-۱- مشخصات کلیدی صنعت فولاد ایران

بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، وزارت دفاع ایالات‌متحده آمریکا در گزارش مواد حیاتی سال ۲۰۲۲، فولاد را در رده منابع استراتژیک طبقه‌بندی کرده است (U.S. Department of Defense, 2022). صنعت فولاد، به‌عنوان یکی از پایه‌های اصلی توسعه صنعتی، از قرن نوزدهم میلادی با اختراع روش‌های مدرن تولید مانند کوره‌های بلند[1] و کنورتورهای بسمر[2] شکل گرفت (WSA, 2023). این صنعت به دلیل نقش کلیدی در ساخت زیرساخت‌ها، خودروسازی و صنایع دفاعی، همواره به‌عنوان موتور محرک رشد اقتصادی کشورها شناخته شده است. به‌عنوان‌مثال، در چین و هند، توسعه صنعت فولاد مستقیماً با رشد تولید ناخالص داخلی و اشتغال‌زایی مرتبط بوده است (OECD, 2021).

ویژگی‌های منحصربه‌فرد ایران، مانند دسترسی به مواد اولیه فراوان (گاز طبیعی و سنگ‌آهن) و منابع انسانی مجرب، هزینه‌های تولید را کاهش داده و امکان رقابت در بازارهای جهانی را فراهم کرده است. این مزایا، ایران را به یکی از مهم‌ترین کشورهای فعال در زمینه صنعت فولاد و صنایع مرتبط تبدیل نموده است. در کنار این نقاط قوت، چالش‌های عمده‌ای نظیر تحریم‌های شدید، محدودیت‌های فناوری و مسائل جدی زیست‌محیطی، چالش‌های اساسی برای این صنعت ایجاد می‌کنند.

درواقع، صنعت فولاد ایران با ویژگی‌های منحصربه‌فردی شناخته می‌شود که آن را از دیگر کشورها متمایز می‌سازد. نخستین ویژگی برجسته، اتکا به منابع داخلی است. ایران با دارا بودن ۲/۷ میلیارد تن ذخایر سنگ‌آهن (رتبه دهم جهانی) و دومین ذخایر گاز طبیعی جهان و همچنین هزینه نیروی انسانی کمتر نسبت به سایر کشورها، هزینه تولید فولاد را تا ۲۵ درصد کمتر از میانگین جهانی نگه‌داشته است (USGS, 2023; BP, 2022). این مزیت مقایسه‌ای، امکان رقابت در بازارهای جهانی را فراهم کرده است؛ به‌طوری‌که در سال ۲۰۲۲، ایران ۱۰/۴ میلیون تن فولاد صادر کرد (WSA, 2023).

ازنظر اشتغال‌زایی، این صنعت مستقیماً ۶۵ هزار شغل و غیرمستقیم ۳۲۰ هزار شغل ایجاد کرده است (International Labour Organization, 2022). استقرار کارخانه‌ها در مناطق کمتر توسعه‌یافته مانند فولاد خوزستان و فولاد مبارکه، موجب کاهش نرخ بیکاری در این مناطق به میزان ۸ تا ۱۲ درصد شده است (United Nations Development Programme, 2021).

در حوزه فناوری، صنعت فولاد ایران ترکیبی از فناوری‌های قدیمی و مدرن را به کار می‌گیرد. درحالی‌که ۷۰ درصد تولید مبتنی بر کوره‌های قوس الکتریک (Electric Arc Furnace) است (OECD, 2022)، تحریم‌ها دسترسی به فناوری‌های نسل جدید مانند هیدروژن سبز را محدود کرده است. بااین‌حال، سرمایه‌گذاری در پلتفرم‌های دانش‌بنیان موجب رشد ۲۰ درصدی ثبت اختراعات مرتبط با فولاد در پنج سال اخیر شده است (World Intellectual Property Organization, 2023).

چالش‌های ساختاری نیز بخشی از ویژگی‌های این صنعت است. مصرف انرژی بالا (معادل ۷.۵ میلیون بشکه نفت خام در سال) و انتشار سالانه ۴۵ میلیون تن دی‌اکسید کربن، ایران را در رتبه نهم جهانی ازنظر ردپای کربن در فولاد قرار داده است (International Energy Agency, 2023). همچنین، ضعف در زنجیره تأمین قطعات صنعتی، وابستگی ۳۵

[1] Blast Furnace
[2] Bessemer Converter

درصدی به واردات تجهیزات را ایجاد کرده است (Majlis Research Center, 2023). بااین‌وجود، برنامه‌های بلندمدتی مانند سند راهبردی فولاد ۱۴۱۰، هدف افزایش تولید به ۵۵ میلیون تن با تأکید بر فناوری‌های پاک را دنبال می‌کند (Ministry of Industry, Mine and Trade, 2023).

۲-۲- آینده‌پژوهی و کارکردهای آن در صنعت فولاد

آینده‌پژوهی به‌عنوان یک حوزه علمی میان‌رشته‌ای، با هدف شناسایی روندهای بلندمدت و سناریوهای محتمل آینده شکل گرفته است (Bell, 2003). ازجمله روش‌های متعارف این حوزه می‌توان به این موارد اشاره کرد:

۱) شناسایی روندها[1]: تحلیل داده‌های تاریخی برای پیش‌بینی تغییرات آینده (Eghbal et al., 2024)

۲) سناریوسازی[2]: توسعه سناریوهای چندگانه بر اساس عدم قطعیت‌های کلیدی (Schwartz, 1991)

۳) روش دلفی[3]: جمع‌آوری نظرات خبرگان برای اجماع‌سازی درباره آینده (Salimi et al., 2023)

مطالعات نشان می‌دهند که ادغام آینده‌پژوهی در برنامه‌ریزی استراتژیک، احتمال موفقیت سازمان‌ها را در مواجهه با تغییرات پیچیده ۴۰ درصد افزایش می‌دهد (Vecchiato, 2015). به‌عنوان‌مثال، پژوهش سازمان همکاری اقتصادی و توسعه (OECD, 2021) بر لزوم استفاده از این روش‌ها در صنایع انرژی برای گذار به سمت اقتصاد کم‌کربن تأکید دارد.

روندپژوهی به‌عنوان بخشی از دانش آینده‌پژوهی بر تحلیل و درک روندهای موجود در محیط تمرکز دارد. مطالعه و شناخت این روندها می‌توانند به سازمان‌ها کمک کنند تا از تغییرات آگاه شوند و به‌درستی به آن‌ها پاسخ دهند (Ansoff, 1975). در این زمینه، استفاده از روش‌های سناریوپردازی برای تفسیر و پاسخ به تغییرات محیط بسیار مهم است (Porter, 1985).

نظر به اهمیت صنعت فولاد که پیشتر به آن اشاره شد، طبیعی است که مطالعاتی با رویکرد آینده‌نگر در این زمینه انجام شده باشد. در جدول **۱** به برخی از تکنیک‌های آینده‌پژوهی، کارکردها، مزایا و معایب هریک و نیز کاربردی که می‌تواند در صنعت فولاد داشته باشد، اشاره شده است. این تکنیک‌ها به سیاست‌گذاران و مدیران صنعتی کمک می‌کنند تا چالش‌های پیشِرو را شناسایی و راهبردهای مؤثری تدوین کنند.

این جدول نشان می‌دهد که ترکیب تکنیک‌های آینده‌پژوهی و روندپژوهی می‌تواند به صنعت فولاد ایران کمک کند تا در برابر تحولات پیچیده جهانی مقاوم‌تر عمل کند. انتخاب هوشمندانه هر تکنیک، با توجه به مزایا و محدودیت‌های آن، نقش کلیدی در تدوین راهبردهای پایدار دارد.

۲-۳- روندهای کلیدی مؤثر بر آینده تولید صنعت فولاد در ایران

روش پژوهش حاضر با بهره‌گیری از چارچوب تحلیلی استیپ‌وی[4] روندهای مؤثر بر تولید صنعت فولاد ایران را در ابعاد چندگانه بررسی کرده است. داده‌های موردنیاز از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و تحلیل محتوای منابع معتبر شامل مقالات علمی استخراج‌شده از پایگاه‌های بین‌المللی و پایگاه‌های داخلی مانند گزارشات صنعتی انجمن جهانی فولاد و وزارت صنعت، معدن و تجارت ایران و همچنین اسناد سیاستی ازجمله برنامه‌های توسعه اقتصادی و سند تحول صنعت فولاد مطابق جدول **۲** روندهای احصا شده در هریک از شش حوزه گردآوری شده‌اند.

به لحاظ کمیت، روندهای اقتصادی (۲۰ مورد) بیشترین تواتر را داشته و پس‌ازآن موضوعات فناوری (۱۵ مورد)، سیاسی (۷ مورد)، زیست‌محیطی (۶ مورد) و اجتماعی و ارزش‌ها (هریک ۵ مورد) را شامل می‌شده است. هرچند تواتر موضوعات اقتصادی در اسناد و گزارش‌ها بیشتر است اما این ضرورتاً بدان معنا نیست که این موضوعات تنها عوامل تعیین‌کننده سمت‌وسوی آتی صنعت فولاد هستند.

[1] Trend Analysis
[2] Scenario Planning
[3] Delphi Method
[4] STEEPV: Social, Technological, Economic, Ecology, Political, Values

جدول ۱. تکنیک‌های آینده‌پژوهی در صنعت فولاد ایران

Table 1. Futures research techniques in the Iranian steel industry

تکنیک	کارکرد	معایب	مزایا	کاربرد در صنعت فولاد
سناریوسازی	توسعه سناریوهای چندگانه مبتنی بر عدم قطعیت‌های کلیدی	زمان‌بری و نیاز به مشارکت گسترده ذی‌نفعان	انعطاف‌پذیری در محیط‌های پیچیده	تحلیل تأثیر مالیات کربن اتحادیه اروپا بر صادرات و تدوین راهبردهای جایگزین
روش دلفی	اجماع‌سازی نظرات خبرگان درباره روندهای آتی	هزینه بالای اجرا و نیاز به هماهنگی طولانی	کاهش سوگیری فردی با استفاده از نظرات جمعی	پیش‌بینی نیازهای فناورانه (مثل انتقال به فولاد سبز) تا ۱۴۱۰
تحلیل تأثیر متقابل	بررسی ارتباط متقابل عوامل کلیدی (فناوری، بازار، سیاست)	نیاز به داده‌های دقیق و تحلیل‌های پیچیده	شناسایی عوامل حیاتی در سیستم‌های پیچیده	تحلیل تأثیر تحریم‌ها بر زنجیره تأمین و تدوین راهکارهای کاهش وابستگی
نقشه‌برداری فناوری	ترسیم مسیر توسعه فناوری‌های نوین در افق زمانی مشخص	نیاز به به‌روزرسانی مستمر با تغییرات فناوری	شفافیت در اولویت‌های سرمایه‌گذاری	برنامه‌ریزی برای جایگزینی کوره‌های سنتی با سیستم‌های احیای مستقیم
تحلیل اس دبلیو او تی	شناسایی نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدها	عدم ارائه راهکارهای عملیاتی برای تهدیدها	سادگی و قابلیت اجرا در مراحل اولیه برنامه‌ریزی	بررسی مزیت دسترسی به گاز ارزان و وابستگی به فناوری وارداتی
برون‌یابی روند	پیش‌بینی آینده بر اساس الگوهای تاریخی	عدم توانایی پیش‌بینی شوک‌های غیرمنتظره (مثل تحریم‌ها)	سادگی و سرعت اجرا	پیش‌بینی تقاضای فولاد در بازارهای منطقه‌ای
تحلیل سری‌های زمانی	بررسی تغییرات داده‌ها در بازه‌های زمانی مشخص	نیاز به داده‌های تاریخی طولانی‌مدت	دقت بالا در شناسایی الگوهای تکرارشونده	تحلیل نوسانات قیمت جهانی سنگ‌آهن و تأثیر آن بر تولید داخلی
تحلیل کلان‌داده	پردازش حجم بالای داده برای شناسایی الگوهای پنهان	هزینه بالای زیرساخت‌های فناوری اطلاعات	کشف ارتباطات غیرخطی و پیچیده	پیش‌بینی تقاضای فولاد با استفاده از داده‌های بازارهای جهانی و سیاست‌های تجاری
پایش محیطی	رصد تغییرات سیاسی، اقتصادی و فناورانه در محیط بیرونی	نیاز به منابع انسانی متخصص برای داده‌های کیفی	شناسایی زودهنگام تهدیدها و فرصت‌ها	رصد تحولات قوانین زیست‌محیطی اتحادیه اروپا و تأثیر آن بر صادرات

۳- روش

این بخش به‌تفصیل، فرآیند پژوهشی صورت گرفته برای شناسایی و تحلیل روندهای کلیدی مؤثر بر زنجیره ارزش فولاد ایران را تشریح می‌کند. رویکرد روش‌شناختی این مطالعه مبتنی بر یک ترکیب پژوهشی نظام‌مند[1] با الهام از اصول مرور سینماتیک[2] (Niksirat et al., 2023) و فرا ترکیب[3] است؛ که امکان تلفیق و تحلیل جامع ادبیات موجود را فراهم می‌آورد. هدف اصلی، افزایش اعتبار یافته‌ها، شفافیت فرآیند پژوهش و اطمینان از قابلیت تکرارپذیری[4] آن است. چارچوب تحلیلی استیپ‌وی به‌عنوان مبنایی برای دسته‌بندی و تحلیل روندها به کار گرفته شده است.

روش فراترکیب، روشی کیفی مبتنی بر مرور نظام‌مند مطالعات کتابخانه‌ای است (Sandelowski & Barroso, 2013) که یافته‌های کیفی پژوهش‌های متعدد در یک حوزه خاص را ترکیب و تفسیر می‌نماید (Noblit & Hare, 1988) تا شناختی عمیق‌تر و مفاهیم بدیع‌تر پیرامون پدیده موردمطالعه به دست آورد (Finfgeld-Connett, 2018).

[1] Synthesis Research Systematic
[2] Review Systematic
[3] synthesis-Meta
[4] replicability

جدول ۲. لیست عوامل مؤثر بر تولید در صنعت فولاد ایران

Table 2. List of factors affecting production in the Iranian steel industry

ردیف	استیپ‌وی	موضوع	منبع
۱	اقتصادی	بحران مالی جهانی	World Bank, 2022
۲	اقتصادی	حجم سرمایه‌گذاری‌ها در صنعت فولاد	OECD, 2022
۳	اقتصادی	کمبود انرژی (زغال‌سنگ، گاز، برق و ...)	IEA, 2023
۴	اقتصادی	هزینه انتقال مواد اولیه	UNCTAD, 2022
۵	اقتصادی	وضعیت منابع معدنی و مواد اولیه	USGS, 2023
۶	اقتصادی	قدرت چانه‌زنی تأمین‌کنندگان	Porter, 1985
۷	اقتصادی	قدرت چانه‌زنی مشتریان	Kotler & Keller, 2016
۸	اقتصادی	تولید ناخالص داخلی	IMF, 2023
۹	اقتصادی	ظرفیت تولید فولاد ایران	World Steel Association, 2023
۱۰	اقتصادی	مصرف فولاد ایران و نیاز بازار	Ministry of Industry, Mine and Trade, 2023
۱۱	اقتصادی	کاهش تقاضا در محصولات پایین‌دستی	McKinsey & Company, 2022
۱۲	اقتصادی	میزان تقاضا در جهان	World Steel Association, 2023
۱۳	اقتصادی	تأثیر چین، هند و ژاپن با سهم ۶۵ درصدی در تولید فولاد دنیا	OECD, 2022
۱۴	اقتصادی	افزایش درآمد	World Bank, 2022
۱۵	اقتصادی	ساختار مالی و تأمین نقدینگی	Central Bank of Iran, 2023
۱۶	اقتصادی	توسعه اقتصادی آسیا و آفریقا	UNIDO, 2022
۱۷	اقتصادی	چالش‌های واردات سنگین آهن	International Trade Administration, 2023
۱۸	اقتصادی	چالش‌های صادرات محصول	World Trade Organization, 2023
۱۹	اقتصادی	اهم فعالیت‌های شرکت‌های شاخص در صنعت فولاد	Fortune, 2023
۲۰	اقتصادی	الزامات و استانداردهای جهانی	ISO, 2023
۲۱	فناورانه	نقش تکنولوژی و ظهور تکنولوژی‌های نوین	Smil, 2016
۲۲	فناورانه	امکانات استخراج منابع معدنی	Azapagic, 2014
۲۳	فناورانه	بهینه‌سازی بهره‌وری خط تولید	IEA, 2023
۲۴	فناورانه	چالش‌های انقلاب صنعتی ۴/۰	Schwab, 2017
۲۵	فناورانه	افزایش طول عمر محصولات	Allwood & Cullen, 2012
۲۶	فناورانه	جایگزینی فولاد با سایر متریال‌ها	Ashby, 2013
۲۷	فناورانه	ورود رقبا با تکنولوژی‌های جدید	Christensen, 1997
۲۸	فناورانه	تنوع در محصولات فولادی	Ghosh, 2020
۲۹	فناورانه	تأثیرات تحول دیجیتال	McKinsey & Company, 2022
۳۰	فناورانه	پشتیبانی فنی و مهندسی	ASM, 2019
۳۱	فناورانه	طراحی خودروهای سبک‌وزن	Kiani & Gandikota, 2020
۳۲	فناورانه	توسعه صنایع پایین‌دستی	UNIDO, 2022
۳۳	فناورانه	بهبود طراحی ساختمان و استفاده مجدد	Calkins, 2009
۳۴	فناورانه	دسترسی جهانی به انرژی مدرن	IEA, 2023
۳۵	فناورانه	توسعه و پیشرفت هوش مصنوعی	Russell & Norvig, 2021
۳۶	زیست‌محیطی	الزام کاهش انتشار کربن	IPCC, 2022
۳۷	زیست‌محیطی	مسائل زیست‌محیطی (ایجاد آلودگی، تأثیر بر سلامتی، تغییرات آب‌وهوا و از دست دادن تنوع گیاهی و جانوری)	United Nations Environment Programme, 2023
۳۸	زیست‌محیطی	سیاست‌های توسعه پایدار	United Nations, 2015

ادامه **جدول ۲.**

Table 2 continues.

ردیف	استیپ‌وی	موضوع	منبع
۳۹	زیست‌محیطی	انتشار گازهای گلخانه‌ای	Le Quéré et al, 2023
۴۰	زیست‌محیطی	مدیریت پسماند صنعتی و بازیافت سرباره فولاد	World Steel Association, 2023
۴۱	زیست‌محیطی	کنترل مصرف آب و توسعه فناوری‌های بازچرخانی آب در فرایند تولید فولاد	International Energy Agency, 2023
۴۲	اجتماعی	آموزش، تحصیلات و مهارت	UNESCO, 2022
۴۳	اجتماعی	تمایل به شهرنشینی	United Nations Human Settlements Programme, 2022
۴۴	اجتماعی	رشد جمعیت جهانی	United Nations, 2015
۴۵	اجتماعی	تغییر الگوهای مصرف و رشد تقاضا برای کالاهای سبز و پایدار	OECD, 2023
۴۶	اجتماعی	مهاجرت نیروی کار	International Labour Organization, 2023
۴۷	سیاسی	وجود دیدگاه سیاسی	BBC, 2023
۴۸	سیاسی	تحریم‌های اقتصادی و تجاری علیه ایران	World Trade Organization, 2023
۴۹	سیاسی	تغییر سیاست‌های صادرات و واردات فولاد	Ministry of Industry, Mine and Trade, 2023
۵۰	سیاسی	ثبات سیاسی در منطقه خاورمیانه	UN, 2022
۵۱	سیاسی	تعرفه‌های گمرکی کشورهای هدف صادراتی	UNCTAD, 2022
۵۲	سیاسی	تأثیر قراردادها و توافقات بین‌المللی (مانند برجام)	Reuters, 2023
۵۳	سیاسی	امنیت سرمایه‌گذاری و حمایت حقوقی از سرمایه‌گذاران خارجی	World Bank, 2023
۵۴	ارزش‌ها	توسعه منطقه‌ای	World Bank, 2022
۵۵	ارزش‌ها	تأثیر فرهنگی بر محیط	Hofstede, 2011
۵۶	ارزش‌ها	مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها در کاهش آلایندگی	UNIDO, 2023
۵۷	ارزش‌ها	تأکید بر مصرف کالاهای داخلی (ایران‌ساخت)	Iran Ministry of Economy, 2023
۵۸	ارزش‌ها	تغییر ترجیحات مشتریان به محصولات سبز و پایدار	OECD, 2023

در عمل، فراترکیب عبارت است از فرایند جستوجو، ارزیابی، ترکیب و تفسیر مطالعات صورت گرفته در یک حوزه خاص (Catalano, 2013). یکی از شناخته‌شده‌ترین و پرکاربردترین الگوهای فراترکیب، مدل سندلوسکی و باروسو (Sandelowski & Barroso, 2013) است که شامل ۷ گام اصلی می‌باشد. در این پژوهش با بهره‌گیری از مدل فراترکیب، گام‌های اصلی این مدل به‌صورت زیر انجام شد:

۳-۱- گام اول: تعیین پرسش پژوهش و معیارهای انتخاب مطالعات

این گام با هدف شفاف‌سازی اهداف پژوهش و تعیین معیارهای نظام‌مند برای انتخاب مطالعات مرتبط انجام شد تا اطمینان حاصل شود که فرآیند مرور، متمرکز و قابل‌اعتماد باشد. این مرحله، پایه‌ای برای ترکیب کیفی یافته‌ها و دست‌یابی به شناخت عمیق‌تر از پدیده موردمطالعه محسوب می‌شود. ابتدا پرسش اصلی پژوهش با عنوان «مهم‌ترین روندهای تأثیرگذار بر تولید صنعت فولاد ایران کدام‌اند؟» تدوین گردید (شکل ۱). سپس برای اطمینان از مرتبط بودن و کیفیت مطالعات ورودی، معیارهای پذیرش و عدم پذیرش به‌دقت تدوین و تعریف گردید.

۳-۱-۱- معیارهای پذیرش

۱) نوع مطالعات: کلیه مطالعات پژوهشی (مقالات علمی-پژوهشی، گزارش‌های تحقیقاتی، پایان‌نامه‌ها و رساله‌ها و کتاب‌های مرتبط) که به‌صورت رسمی منتشر شده‌اند.

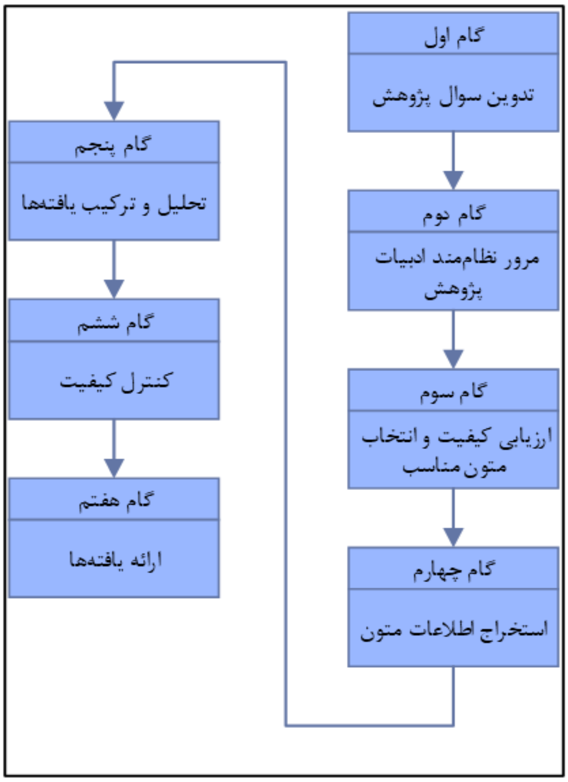
۲) محدوده زمانی: مطالعات منتشرشده در بازه زمانی وسیع از سال ۱۹۷۵ تا ۲۰۲۳ میلادی. این بازه زمانی گسترده به‌منظور پوشش تحولات

تاریخی و روند تکاملی صنعت فولاد ایران و جهان در دهه‌های اخیر انتخاب شد.

۳) تمرکز موضوعی و جغرافیایی: مطالعاتی که به‌طور مستقیم بر صنعت فولاد ایران تمرکز دارند. علاوه بر این، مطالعات مرتبط با صنعت فولاد در کشورهای با ساختار اقتصادی و صنعتی مشابه ایران (مانند چین، هند، ترکیه) نیز درصورتی‌که دارای یافته‌های قابل‌تعمیم و بینش‌های مرتبط بودند، موردبررسی اولیه قرار گرفتند تا چشم‌انداز جامع‌تری فراهم آید.

۴) دسترسی به متن کامل: دسترسی کامل به متن مقاله یا گزارش پژوهشی برای امکان تحلیل عمیق محتوا و استخراج داده‌ها

۵) محتوای پژوهشی: مطالعاتی که دارای شواهد تجربی، داده‌های واقعی یا تحلیل‌های کیفی و کمی مستدل از پدیده‌های مرتبط با تولید و عوامل اثرگذار بر صنعت فولاد بودند.



شکل ۱. گام‌های مدل فراترکیب (Sandelowski & Barroso, 2013).

Figure 1. Steps of the metasynthesis model (Sandelowski & Barroso, 2013).

۳-۱-۲- معیارهای عدم پذیرش

۱) منابع غیررسمی: مقالات خبری، گزارش‌های ژورنالیستی غیرپژوهشی، وبلاگ‌ها و سایر منابع غیرعلمی و غیررسمی.

۲) مقالات صرفاً مروری: مقالات مروری که فاقد یافته‌های جدید بودند

۳) فقدان کیفیت روش‌شناسی: مطالعاتی که دارای ضعف‌های جدی در طراحی روش تحقیق، جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل یا ارائه نتایج بودند و از استانداردهای علمی کافی برخوردار نبودند.

۴) فقدان ارتباط موضوعی: مطالعاتی که علیرغم تمرکز بر فولاد، به موضوعاتی کاملاً بی‌ارتباط با ابعاد تولید و عوامل اثرگذار بر آن می‌پرداختند (مثلاً صرفاً مطالعات شیمی مواد فولادی بدون ملاحظات اقتصادی و صنعتی).

۳-۲- گام دوم: جست‌وجوی نظام‌مند منابع

این مرحله با هدف شناسایی جامع مطالعات مرتبط، از طریق جست‌وجوی ساختاریافته در پایگاه‌های علمی معتبر انجام شد. این فرآیند، بررسی کلیه شواهد موجود را بدون سوگیری انتخابی یا حذف غیرمنطقی تضمین می‌کند. بدین منظور، آثار علمی مرتبط با استفاده از کلیدواژه‌های استخراج‌شده مطابق جدول **۳** در پایگاه‌های داده بین‌المللی و داخلی موردبررسی قرار گرفتند.

۳-۲-۱- استراتژی جستجو

برای پرهیز از هرگونه سوگیری در انتخاب منابع، جستجو در فاز اولیه بدون اعمال فیلترهای محدودکننده غیرمنطقی (مانند سال انتشار) صورت گرفت تا حداکثر منابع ممکن شناسایی شوند. سپس، تمامی آثار مرتبط با شرایط ایران یا کشورهای مشابه از منظر ساختار صنعت فولاد (مانند چین، هند) که می‌توانستند بینش‌های قابل‌تعمیم ارائه دهند، موردبررسی قرار گرفتند. درنهایت ۱۲۰۰ منبع شناسایی و در یک پایگاه داده مرجع جهت جلوگیری از تکرار و قلم افتادگی ذخیره و مدیریت شدند.

۳-۳- گام سوم: غربالگری و انتخاب متون مناسب

در این مرحله، منابع علمی شناسایی‌شده در گام قبلی، تحت یک فرآیند پالایش و غربالگری دقیق و چندمرحله‌ای قرار گرفتند تا تنها مطالعات با کیفیت بالا و مرتبط با پرسش پژوهش انتخاب شوند.

۳-۳-۱- مرحله اول (غربالگری اولیه) عنوان و چکیده:

ابتدا، مجموعاً ۱۲۰۰ منبع علمی از طریق جستجو اولیه در پایگاه‌های اطلاعاتی مختلف در گام قبل شناسایی شدند وارد مرحله غربالگری اولیه گردیدند. تمامی نتایج جستجو ازنظر عنوان و چکیده موردبررسی قرار گرفتند تا مطالعات غیر مرتبط، تکراری و خارج از محدوده زمانی حذف شوند. در این مرحله، منابع تکراری نیز حذف شدند. پس از غربالگری اولیه، تعداد مطالعات به ۴۵۰ منبع کاهش یافت.

۳-۳-۲- مرحله دوم غربالگری کامل متن و ارزیابی کیفیت:

متن کامل ۴۵۰ منبع باقیمانده به‌دقت مطالعه شد تا از انطباق کامل آن‌ها با معیارهای پذیرش و عدم پذیرش اطمینان حاصل شود. برای ارزیابی کیفیت روش‌شناسی مطالعات، از چک لیست‌های معتبر و مناسب با نوع پژوهش استفاده شد:

۱) چک‌لیست سی ای اس پی برای مطالعات کیفی
۲) چک‌لیست جی بی آی برای مطالعات کمی

۳-۳-۳- فرآیند ارزیابی توسط ارزیابان مستقل

۳) فرآیند ارزیابی کیفیت توسط دو ارزیاب مستقل و باتجربه در زمینه متدولوژی تحقیق و صنعت فولاد انجام گرفت. هر دو ارزیاب به‌طور جداگانه تمامی مطالعات را بر اساس چک‌لیست‌های مربوطه ارزیابی کردند و به هر مطالعه یک نمره کیفی در مقیاس ۰ تا ۱۰ اختصاص دادند.

جدول ۳. مرور نظام‌مند روندهای مؤثر بر تولید صنعت فولاد

Table 3. Systematic review of trends affecting steel industry production

کلیدواژه‌ها	پایگاه‌های داده بررسی‌شده	بازه زمانی
صنعت فولاد ایران، تولید فولاد	۱- پایگاه‌های داده علمی بین‌المللی	۱۹۷۵-۲۰۲۳
روندهای تولید	Scopus	
عوامل مؤثر بر تولید	Web of Science	
مرور نظام‌مند	ScienceDirect	
تحلیل روند	۲- منابع صنعتی و سازمانی	
بهبود تولید	World Steel Association	
چالش‌های صنعت فولاد	سازمان‌های دولتی ایران	
تاب‌آوری‌های تولید فولاد	وزارت صنعت، معدن و تجارت ایران	
مدیریت تولید در صنعت فولاد	مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی	
	سازمان‌های بین‌المللی	
	گزارش‌های بازار فولاد (OECD)	
	تحلیل‌های مصرف انرژی در صنایع سنگین	
	۳- پایگاه‌های داده منطقه‌ای / ملی	
	پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی	
	مجلات علمی فارسی (MagIran)	
	پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC)	
	۴- منابع خاکستری	
	پایگاه‌های دولتی ایران	
	مرکز آمار ایران (آمارهای تولید فولاد)	
	گمرک ایران (داده‌های صادرات و واردات)	
	پایگاه‌های شرکت‌های فولادی	
	فولاد مبارکه اصفهان (گزارش‌های سالانه)	
	شرکت ملی فولاد ایران	

۳-۳-۴- معیار حذف کیفیت

مطالعاتی که نمره ارزیابی کیفی آن‌ها از ۷ (در مقیاس ۱۰ نمره‌ای) کمتر بود، از مرحله بعدی حذف شدند. این آستانه، به‌منظور تضمین کیفیت بالای مطالعات ورودی به تحلیل نهایی تعیین گردید.

۳-۳-۵- حل اختلافات ارزیابان

در مواردی که اختلاف‌نظر بین دو ارزیاب در مورد پذیرش یا عدم پذیرش یک مطالعه یا نمره کیفی آن وجود داشت (بیش از ۱ نمره اختلاف)، از روش دلفی و با حضور یک داور سوم برای رسیدن به اجماع و تصمیم نهایی استفاده شد. این فرآیند، اعتبار و دقت انتخاب مطالعات را به‌شدت افزایش داد.

درنهایت از ۴۵۰ منبع پس از غربالگری اولیه، بعد از ارزیابی کیفیت، ۲۳۰ منبع علمی و گزارش تحقیقاتی معتبر که دارای کیفیت روش‌شناسی بالا و مرتبط با پرسش پژوهش بودند (۱۵۰ مقاله علمی، ۵۰ گزارش صنعتی، ۳۰ سند سیاستی) جهت ورود به مرحله بعد انتخاب شدند.

۳-۴-گام چهارم: استخراج اطلاعات متون

در این مرحله، داده‌های مرتبط و کلیدی از ۲۳۰ مطالعه منتخب به‌صورت نظام‌مند استخراج و سازمان‌دهی شدند. برای اطمینان از پوشش جامع ابعاد مختلف عوامل اثرگذار بر صنعت فولاد، از مدل جامع و چندبعدی استیپ‌وی استفاده شد. این مدل، امکان طبقه‌بندی عوامل در شش دسته اصلی را فراهم می‌آورد.

پس از بررسی نظام‌مند ۲۳۰ مطالعه، ۵۸ متغیر کلیدی مؤثر بر تولید صنعت فولاد ایران با اتکا بر چارچوب استیپ‌وی استخراج شد. توزیع متغیرها:

۱) اقتصادی: ۲۰ متغیر (بحران مالی جهانی، حجم سرمایه‌گذاری، ...)
۲) فناورانه: ۱۵ متغیر (ظهور فناوری‌های نوین، بهینه‌سازی خط تولید، ...)
۳) اجتماعی: ۵ متغیر (آموزش و مهارت، شهرنشینی، ...)
۴) زیست‌محیطی: ۶ متغیر (کاهش کربن، انتشار گازهای گلخانه‌ای، ...)
۵) سیاسی: ۷ متغیر (دیدگاه سیاسی، تحریم،...)
۶) ارزشی: ۵ متغیر (توسعه منطقه‌ای، تأثیر فرهنگی،..)

این گزینش مبتنی بر غربالگری دومرحله‌ای (حذف مطالعات نامرتبط + تأکید بر منابع همسو با اهداف) انجام شد تا اطمینان حاصل شود متغیرها ابعاد مختلف صنعت فولاد ایران را پوشش می‌دهند.

۳-۵-گام پنجم: تحلیل و ترکیب یافته‌های کیفی

پس از گردآوری عوامل اولیه از منابع منتخب، داده‌های کیفی گردآوری‌شده، به‌صورت نظام‌مند مورد تحلیل قرار گرفتند. در این مرحله، ابتدا عوامل مشابه و هم‌پوشان با روش مقایسه‌ای تطبیقی شناسایی و سپس ادغام شدند تا از تکرار و پراکندگی مفهومی جلوگیری گردد. در ادامه، با بهره‌گیری از اجماع خبرگان و مرور تحلیلی اسناد، اقدام به پالایش و تلفیق نهایی داده‌ها نمود. درنهایت، عوامل کلیدی برحسب ارتباط مفهومی و نقش راهبردی آنان، ذیل ابعاد مدل تحلیلی استیپ‌وی (اجتماعی، فناورانه، اقتصادی، زیست‌محیطی، سیاسی و ارزش‌ها) طبقه‌بندی شدند. این مرحله با هدف افزایش تمرکز بر عوامل راهبردی، کاهش داده‌های موازی و ارتقاء اعتبار نتایج پژوهش انجام شد.

۳-۶-گام ششم: کنترل کیفیت یافته‌ها

به‌منظور سنجش اعتبار یافته‌ها، از تحلیل‌گر مستقل (دارای مدرک مدیریت و آشنایی با صنعت فولاد) برای استخراج مجدد متغیرهای کلیدی استفاده شد. میزان توافق بین تحلیل‌گران با شاخص قابلیت اعتماد هولستی[1] مطابق رابطه (۱) محاسبه گردید:

$$PAO = 2M/(N1+N2) \quad (۱)$$

که در آن M: تعداد موارد مشترک و N1 و N2 تعداد متغیرهای شناسایی‌شده توسط هر تحلیل‌گر هستند. این ضریب بین ۰ و ۱ قرار دارد و هرچه به عدد یک نزدیک‌تر باشد، اعتبار یافته‌ها بالاتر است. نمره قبولی بر اساس این آزمون ۰/۷ تعیین‌شده که در این پژوهش ضریب توافق

[1] Holsti's Coefficient of Reliability

۰/۸۳ به دست آمد که نشان‌دهنده اعتبار بالای یافته‌هاست.

۳-۷-گام هفتم: ارائه یافته‌ها

با بهره‌گیری از روش فراترکیب و چارچوب استیپ‌وی، درمجموع ۳۳ عامل کلیدی مؤثر بر تولید صنعت فولاد ایران شناسایی و در قالب ابعاد شش‌گانه دسته‌بندی شدند (جدول ۴).

۴- یافته‌ها

بر اساس تحلیل نظام‌مند یافته‌ها در چارچوب استیپ‌وی، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر تولید صنعت فولاد در ایران در شش حوزه کلیدی شناسایی شدند. این عوامل، با تأکید بر چالش‌ها و فرصت‌های خاص ایران، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌دهی به تولید، توزیع و رقابت‌پذیری این صنعت ایفا می‌کنند. این عوامل به تفکیک حوزه‌های استیپ‌وی در جدول **۵** تشریح شده‌اند. همان‌طور که در جدول **۵** ملاحظه می‌شود، برخی از موارد را می‌توان با یکدیگر تلفیق کرد، برخی ذیل سایر موارد قرار می‌گیرند و برخی نیز به‌نوعی تکراری هستند. با این توضیح، در جدول **۶** بر اساس تحلیل ۳۳ عامل اولیه تأثیرگذار بر تولید صنعت فولاد ایران و با استفاده از چارچوب استیپ‌وی، روندهای کلیدی به‌عنوان الگوهای تغییر نظام‌مند طراحی شده‌اند که در افق پنج‌ساله (۱۴۰۳–۱۴۰۸) تأثیر قابل‌توجهی بر تولید، رقابت‌پذیری و پایداری این صنعت خواهند داشت. فرآیند ادغام عوامل بر اساس سه مرحله زیر انجام شد:

۴-۱- تحلیل محتوایی و حذف هم‌پوشانی

با بررسی دقیق تعاریف و نمونه‌های متنی هر عامل، موارد با مضمون مشترک شناسایی و در یک گروه منسجم تجمیع شدند تا از پراکندگی و تکرار جلوگیری شود.

۴-۲- طبقه‌بندی جهت و شدت تأثیر (مثبت/ منفی/ دوجانبه)

هر گروه از عوامل بر اساس جهت اثر (مثبت، منفی یا دوجانبه) و شدت تأثیرشان بر زنجیره تولید ارزیابی گردید.

اثر مثبت (+): عاملی که به بهبود، تسریع یا تقویت عملکرد تولید منجر می‌شود (مثلاً فناوری‌های انقلاب صنعتی ۰/۴ که کارایی و کیفیت را ارتقاء می‌دهند).
اثر منفی (−): عاملی که هزینه‌ها را افزایش، ضایعات را بیشتر یا ریسک تولید را تشدید می‌کند (مانند تشدید مقررات زیست‌محیطی بدون فراهم بودن فناوری‌های پاک). اثر دوجانبه (↔): عاملی که در شرایط یا سناریوهای مختلف می‌تواند هم به‌عنوان فرصت و هم به‌عنوان تهدید عمل کند؛ یعنی هم جنبه‌های مثبت و هم جنبه‌های منفی قابل بروز دارد (مثلاً وابستگی به گاز طبیعی که از یک‌سو مزیت هزینه‌ای دارد و از سوی دیگر در شرایط تحریم به نقطه‌ضعف تبدیل می‌شود).
این ارزیابی کیفی-کمی از طریق پرسش‌نامه دلفی دومرحله‌ای با مشارکت ۱۲ خبره (اساتید و مدیران صنعت) و نمره‌گذاری شدت اثر بر مبنای طیف لیکرت ۱–۱۰ انجام شد.

۴-۳- قابلیت برنامه‌ریزی و اولویت‌بندی عملی

عواملی که امکان تبدیل‌شدن به پروژه یا سیاست اجرایی را داشتند (مثال: جایگزینی گاز طبیعی با هیدروژن سبز؛ سیستم‌های بازیافت آب) در اولویت قرار گرفتند. در این مرحله نیز خبرگان با توجه به قابلیت مداخله سیاست‌گذارانه و پایداری اثر در درازمدت، امتیاز نهایی هر گروه را تعیین کردند. فرایند فوق در دو دور دلفی پیاده‌سازی و تا حصول حداقل «ضریب هماهنگی کندال» ($\text{Kendall's } W \geq 0.7$) ادامه یافت.

روندهای مثبت (۲، ۵، ۶، ۸): تمرکز بر روندهایی مانند تحول دیجیتال، گذار به اقتصاد سبز، تاب‌آوری زنجیره تأمین و توسعه سرمایه انسانی، موجب کاهش هزینه‌های عملیاتی، ارتقای بهره‌وری و تنوع‌بخشی به محصولات خواهد شد. این تحولات نه‌تنها امکان افزایش میزان تولید و ظرفیت رقابت‌پذیری شرکت‌ها را فراهم می‌کند، بلکه با تقویت مهارت‌های نیروی انسانی و به‌کارگیری فناوری‌های نوین، قدرت چانه‌زنی ایران را در بازارهای داخلی و صادراتی افزایش می‌دهد. سرمایه‌گذاری اثربخش در این حوزه‌ها می‌تواند مزیت رقابتی پایدار برای زنجیره ارزش فولاد کشور ایجاد کند. نتایج نهایی این ادغام و اولویت‌بندی در جدول **۶** ارائه‌شده است.

جدول ۴. توزیع عوامل کلیدی در ابعاد استیپ‌وی

Table 4. Distribution of key factors in Stepway dimensions

ابعاد استیپ‌وی	تعداد عوامل در هر بعد
اجتماعی (S)	۵
فناورانه (T)	۶
اقتصادی (E)	۸
زیست‌محیطی (E)	۵
سیاسی (P)	۵
ارزش‌ها (V)	۴

جدول ۵. لیست عوامل تأثیرگذار بر تولید صنعت فولاد ایران

Table 5. List of factors affecting the production of the Iranian steel industry

حوزه	عوامل تأثیرگذار
اجتماعی (S)	۱-نرخ رشد جمعیت و شهرنشینی: ارشد تقاضا برای محصولات فولادی در زیرساخت‌ها، مسکن و توسعه شهری ۲-افزایش آگاهی محیطزیستی و نیاز اجتماعی به محصولات سبز: گرایش جامعه به فولاد با آلایندگی کمتر و مسئولیت‌پذیری در مصرف ۳-مهاجرت داخلی و خارجی نیروی کار: تأثیر بر دسترسی به نیروی کار ماهر، تولید و بهره‌وری ۴-چالش مهارتی نیروی کار در فناوری‌های نوین: ضرورت بهبود مهارت‌ها جهت پذیرش و بهره‌برداری از تکنولوژی‌های جدید ۵-پیشرفت تحصیلات و مهارت نیروی انسانی: ارتقاء بهره‌وری، کاهش خطا و پذیرش فناوری‌های پیشرفته
فناورانه (T)	۶-تحول دیجیتال و انقلاب صنعتی نسل ۴.۰: دیجیتال‌سازی، افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه و داده‌محوری در زنجیره تولید ۷-توسعه فناوری‌های فولاد سبز: نوآوری فناورانه جهت کاهش آلایندگی و رقابت با بازیگران جهانی ۸-بهینه‌سازی خطوط تولید و فرآیندها: بهبود بهره‌وری، کاهش ضایعات تولید و سودآوری بیشتر ۹-توسعه فناوری‌های ساخت سبک و محصولات نوین فولادی: افزایش تقاضا در ساخت‌وساز و صنایع نوین ۱۰-فناوری‌های بازیافت و استفاده مجدد: توسعه اقتصاد چرخشی و کاهش هزینه‌های محیطزیستی ۱۱-گرایش به محصولات هوشمند و انعطاف‌پذیری زنجیره تأمین: اهمیت تکنولوژی‌های نوظهور برای انطباق با تحولات بازار
اقتصادی (E)	۱۲-تغییرات جهانی قیمت انرژی (نفت، گاز،...): تأثیر مستقیم بر هزینه‌های تولید، حاشیه سود و رقابت‌پذیری ۱۳-نوسان قیمت جهانی فولاد و نقش ابر تولیدکنندگان (چین، هند،...): تأثیر قیمتی و صادراتی برای ایران ۱۴-تغییرات نرخ ارز و تورم داخلی: افزایش هزینه‌های تولید، کاهش مزیت رقابتی ۱۵-رکود بازار داخلی و کاهش تقاضا: افت تولید و درآمد فولادی‌ها ۱۶-رشد اقتصاد جهانی و فرصت‌های در بازارهای نوظهور: بازارهای جدید صادراتی برای ایران ۱۷-کاهش سرمایه‌گذاری خارجی و دسترسی به فناوری: محدودیت برای نوسازی خطوط و ورود فناوری‌های روز ۱۸-رقابت منطقه‌ای با تولیدکنندگان پیشرو: فشار مضاعف بر ارتقاء کیفیت و قیمت محصولات ۱۹-لجستیک و حمل‌ونقل مواد اولیه و محصول: افزایش هزینه‌های زنجیره ارزش و تأثیر بر بهره‌وری کلی
زیست‌محیطی (E)	۲۰-قوانین و استانداردهای الزام‌آور کاهش انتشارات و کربن: تحمیل هزینه‌های تطبیق فناوری، ضرورت حرکت به سمت فولاد سبز ۲۱-بحران منابع آبی و محدودیت فناوری‌های بازیافت: نیاز جدی به سرمایه‌گذاری و تغییر فرآیندهای مصرف آب ۲۲-تغییرات اقلیمی و ریسک تأمین مواد اولیه: تهدید پایداری تولید و افزایش ریسک‌های زنجیره تأمین ۲۳-توسعه استانداردهای محیطزیستی جهانی: فشار خارجی برای تطبیق با مقررات کشورهای بازار هدف (تولید فولاد سبز و رقابت در بازارهای بین‌المللی) ۲۴-کمبود منابع انرژی پاک (برق و گاز): افزایش هزینه تولید و کاهش بهره‌وری در نبود انرژی ارزان

ادامه **جدول ۵.**

Table 5. Continued.

حوزه	عوامل تأثیرگذار
سیاسی (P)	۲۵-ثبات سیاسی منطقه‌ای و تأثیر بر سرمایه‌گذاری: ایجاد فرصت/محدودیت برای جذب سرمایه و فعالیت بنگاه‌های خارجی
	۲۶-تحریم‌ها و محدودیت‌های بین‌المللی: کاهش صادرات و دشواری تأمین فناوری‌ها
	۲۷-جنگ و اختلالات منطقه‌ای در زنجیره تأمین: افزایش هزینه مواد اولیه و کاهش اطمینان تولید
	۲۸-سیاست‌های صادرات و واردات فولاد: تأثیر مستقیم بر سهم بازار، رقابت‌پذیری و دسترسی به مارکت‌ها
	۲۹-تعرفه‌ها و محدودیت‌های بازارهای صادراتی: کاهش مزیت‌های صادراتی ایران در بازارهای هدف
ارزش‌ها (V)	۳۰-تغییر ترجیحات جامعه و مشتری به محصولات دوستدار محیط‌زیست: رشد تقاضا برای فولاد پایدار، سبز و کم‌مصرف
	۳۱-تأکید بر مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها در محیط‌زیست: الزام قانونی و تقویت برند
	۳۲-تأثیر فرهنگ‌سازمانی بر بهره‌وری: بهبود کیفیت و کارایی و کاهش هزینه‌های غیرمستقیم
	۳۳-توجه به انرژی‌های پایدار در تولید فولاد: مزیت رقابتی و کاهش هزینه بلندمدت

جدول ۶. روندهای کلیدی مؤثر بر آینده تولید صنعت فولاد

Table 6. Key trends affecting the future of steel industry production

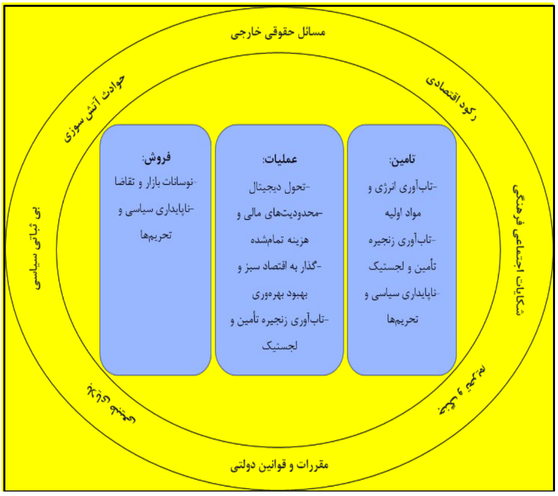
روند	عنوان روند	جهت	امتیاز نهایی (۰-۱۰)	تأثیر کلان	عوامل ادغام‌شده
۱	تاب‌آوری در برابر بحران انرژی و مواد اولیه	منفی	۹/۳	کمبود مداوم انرژی (آب، برق، گاز) و تأمین نامطمئن قراضه، بزرگ‌ترین مانع تولید پایدار.	۲،۳،۴،۱۶،۱۷
۲	گذار به اقتصاد سبز و بهبود بهره‌وری منابع	مثبت	۹/۰	سرمایه‌گذاری در فناوری‌های کم‌کربن، بازیافت و استاندارد زیست‌محیطی، ایجاد مزیت رقابتی.	۲۱،۲۲،۲۳
۳	محدودیت‌های مالی و افزایش هزینه تمام‌شده	منفی	۸/۹	تورم بالا، نرخ بهره و پیچیدگی تأمین مالی، هزینه سرمایه‌گذاری و تولید را بالا می‌برد.	۱۵،۱۸،۱۹،۲۰
۴	ناپایداری سیاسی و تحریم‌ها	منفی	۹/۱	تحریم‌ها، تعرفه‌ها و بی‌ثباتی سیاستی، هزینه‌های بازرگانی را تشدید می‌کند.	۲۸،۲۹،۳۰،۳۱
۵	تحول دیجیتال و انقلاب صنعتی چهارم	مثبت	۸/۷	پیاده‌سازیIoT ، هوش مصنوعی و تحلیل داده، منجر به بهینه‌شدن تولید می‌شود.	۶،۷،۸،۹،۱۰
۶	تاب‌آوری زنجیره تأمین و اتوماسیون لجستیک	مثبت	۸/۵	مکانیزاسیون لجستیک و مدیریت ریسک هوشمند، ثبات تأمین را افزایش می‌دهد.	۲۴،۲۵،۲۶،۲۷
۷	نوسانات بازار و تقاضای فولاد	دو جانبه	۸/۲	رشد تقاضا و صادرات فرصت است اما نوسان قیمت و سیاست‌های تجاری تهدید می‌شود.	۱۱،۱۲،۱۳،۱۴
۸	توسعه سرمایه انسانی و چابکی سازمانی	مثبت	۷/۸	ارتقاء مهارت‌ها، نوآوری سازمانی و چابکی فرایندها، توان انطباق با تغییرات را افزایش می‌دهد.	۱،۵،۳۲،۳۳

روندهای منفی (۱، ۳، ۴، ۷): بررسی روندهای دارای جهت منفی نشان می‌دهد که تداوم چالش‌هایی نظیر کمبود انرژی و مواد اولیه، محدودیت‌های مالی، هزینه‌های فزاینده تولید و فشار تحریم‌ها، تهدیدی جدی برای تداوم

تولید و سودآوری این صنعت است. با توجه به اهمیت زنجیره تأمین پایدار، ضرورت دارد سیاست‌های فوری برای بهبود امنیت انرژی، تأمین مواد اولیه، افزایش بهره‌وری منابع و مذاکره جهت تعدیل محدودیت‌های بین‌المللی در دستور کار قرار گیرد. همچنین حرکت به سمت فناوری‌های کم‌آب و سبز و اصلاح سیاست‌های ارزی و مالی، شرط بقا و رشد زنجیره تولید فولاد خواهد بود.

روند دو وجهی (۷): نوسانات بازار و تقاضا، به‌عنوان روندی دووجهی، همواره می‌تواند فرصت یا تهدید باشد. از یک‌سو، افزایش تقاضا و صادرات فولاد زمینه توسعه و سودآوری را ایجاد می‌کند، اما از سوی دیگر ناپایداری قیمت‌ها و سیاست‌های تجاری می‌تواند ریسک‌های جدی برای سرمایه‌گذاری و تولید به همراه داشته باشد؛ بنابراین، استفاده از ظرفیت‌های تحقیق و توسعه، تقویت انعطاف‌پذیری خطوط تولید و توسعه بازارهای هدف، لازمه بهره‌برداری حداکثری از این روند است؛ در غیر این صورت، غفلت از این حوزه می‌تواند موقعیت ایران را در بازارهای منطقه‌ای و جهانی تضعیف کند.

برای درک بهتر تأثیر این روندها، لازم است نقاط اثر آن‌ها بر زنجیره تأمین شناسایی شود. در این پژوهش از مدل دونگ و دیگران ۲۰۲۳ استفاده شده است که مبتنی بر ارزیابی ریسک زنجیره تأمین با رویکرد پیش‌دستانه است. نقاط تأثیر مطابق شکل **۲** به هشت دسته تقسیم شده‌اند.



شکل ۲. عوامل تأثیرگذار بر زنجیره تأمین فولاد برگرفته از مدل دونگ و همکاران (Dong et al., 2023).

Figure 2. Factors influencing the steel supply chain derived from the model of Dong et al. (Dong et al., 2023).

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که صنعت فولاد ایران باوجود برخورداری از مزیت‌های استراتژیک همچون منابع غنی سنگ‌آهن و انرژی، زنجیره تأمین گسترده و ظرفیت بالای نیروی انسانی ـ طی سال‌های آینده با چالش‌های سیستماتیک و فرصت‌هایی تحول‌آفرین مواجه خواهد بود. نتایج تحلیل و تجمیع ۳۳ عامل کلیدی و ادغام آن‌ها در قالب هشت روند اصلی (جدول ۶) حاکی از آن است که پایداری این صنعت متأثر از سه عامل ساختاری است: بحران در منابع انرژی و مواد اولیه، گذار به فناوری‌های جدید (سبز و دیجیتال) و فشارهای محیطی و سیاسی فزاینده.

امتیازدهی و اولویت‌بندی روندها توسط خبرگان صنعت و دانشگاه نشان داد که شکنندگی تأمین انرژی و مواد اولیه (۹/۳)، تشدید محدودیت‌های مالی و تحریم‌ها (۸/۹ و ۹/۱) و لزوم تسریع در نوسازی فناورانه و محیط‌زیستی (۸/۷ و ۹/۰) از مهم‌ترین چالش‌های آینده هستند. در مقابل، تحول دیجیتال، بهبود بهره‌وری منابع، تاب‌آوری زنجیره تأمین و ارتقاء سرمایه انسانی، فرصت‌هایی کلیدی‌اند که بدون توجه به آن‌ها، مزیت رقابتی پایدار صنعت تضعیف خواهد شد. برخلاف رویکردهای سنتی، این پژوهش با الگوبرداری از مدل دونگ و دیگران ۲۰۲۳ تأکید می‌کند که نقطه اثر هر روند بر یکی از سه مرحله اصلی زنجیره ارزش فولاد (تأمین، عملیات، فروش) حداکثر سازی اثربخشی سیاست‌های توسعه را می‌طلبد. تحلیل روندها بر اساس نقاط اثر نشان می‌دهد:

۱) تأمین: بیش‌ترین آسیب‌پذیری ناشی از ریسک قطع انرژی، کمبود مواد اولیه و تحریم‌هاست.

۲) عملیات: گذار به فناوری‌های دیجیتال و سبز، مدیریت هزینه‌ها و ارتقاء سرمایه انسانی نقشی تعیین‌کننده در رقابت‌پذیری و پایداری تولید دارد.

۳) فروش: نوسانات بازار جهانی، تغییر تقاضا و محدودیت‌های صادراتی روندهای غالب‌اند که مدیریت هوشمندانه آن‌ها، بازارپذیری و ارزآوری را تضمین خواهد کرد.

درمجموع، مسیر آینده صنعت فولاد ایران، در گرو سیاست‌گذاری یکپارچه، تقویت انعطاف‌پذیری و

سرعت‌بخشی به نوسازی فناورانه و زیست‌محیطی است. اجرای راهکارهای هدفمند در هر بخش از زنجیره ارزش نه‌تنها تهدیدها را مهار می‌کند، بلکه فرصت‌های نوین رقابت‌پذیری و رشد پایدار را رقم خواهد زد.

۵-۱- راهکارها

با توجه به ماهیت و نقاط اثر روندهای کلیدی شناسایی‌شده، تدوین و اجرای راهکارهایی متناسب با هر بخش زنجیره ارزش فولاد (بر مبنای مدل تحلیلی پژوهش) ضروری است:

- **بخش تأمین**

۱) تنوع‌بخشی منابع انرژی: سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر و هیدروژن، کاهش وابستگی به شبکه گاز و برق و توسعه ظرفیت ذخیره‌سازی مواد اولیه

۲) هوشمند سازی لجستیک تأمین: بهره‌برداری از فناوری‌های دیجیتال برای رصد آنی موجودی‌ها و مسیرهای حمل‌ونقل

۳) تحکیم ائتلاف‌های راهبردی و دیپلماسی صنعتی: گسترش همکاری با تأمین‌کنندگان داخلی، منطقه‌ای و بین‌المللی و توسعه قراردادهای پایاپای برای مقابله با ریسک تحریم‌ها و محدودیت‌های صادراتی

- **بخش عملیات**

۱) تسریع نوسازی فناورانه: جایگزینی تجهیزات فرسوده با فناوری‌های انقلاب صنعتی ۴/۰ (اتوماسیون، هوش مصنوعی و تحلیل داده) به‌منظور ارتقاء بهره‌وری و مدیریت منعطف تولید

۲) تقویت برنامه‌های گذار به اقتصاد سبز: سرمایه‌گذاری گسترده در فناوری‌های کم‌کربن، بازیافت آب، استفاده هوشمندانه از انرژی و رعایت استانداردهای محیط‌زیستی جهانی

۳) ارتقاء سرمایه انسانی و چابکی سازمانی: آموزش مهارت‌های نوین به کارکنان، توسعه فرهنگ نوآوری و توانمندسازی ساختارها برای انطباق سریع با تغییرات محیطی و فناوری

۴) بازآرایی ساختار مالی بنگاه‌ها: اتخاذ رویکردهای خلاقانه در تأمین مالی (مثل ابزارهای بازار سرمایه، صندوق پروژه و سرمایه‌گذاری ریسک‌پذیر) و کنترل هزینه‌های تولید، به‌ویژه در شرایط تورمی و تحریمی

- **بخش فروش و بازار**

۱) توسعه بازارهای صادراتی جدید و متنوع‌سازی سبد محصولات: تمرکز بر بازارهای نوظهور آسیا و آفریقا، ارائه محصولات با ارزش‌افزوده بالا و انطباق با استانداردهای خاص هر بازار

۲) بهره‌گیری از هوش تجاری و مدیریت داده‌های بازار: پایش پیوسته نوسانات تقاضا، شناسایی روندهای جهانی و تحلیل ریسک‌های بازار؛ جهت افزایش تاب‌آوری در برابر شوک‌ها

۳) تولید محصولات سبز دارای گواهی‌نامه‌های زیست‌محیطی: برای عبور از موانع مقرراتی و حضور موفق‌تر در بازارهای ممتاز

۴) تقویت دیپلماسی صادراتی: اتخاذ راهبردهای منعطف برای مدیریت تهدیدهای تحریم و استفاده حداکثری از ظرفیت تعاملات منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای

۵-۲- جمع‌بندی راهبردی

اجرای منسجم و مرحله‌ای این راهکارها بر اساس مدل تحلیلی پژوهش، ضمن مدیریت ریسک‌ها و بهینه‌سازی منابع، بسترساز شکل‌گیری یک «صنعت فولاد هوشمند، پایدار، کم‌کربن و رقابت‌پذیر» تا افق ۱۴۰۸ خواهد بود. این مسیر نیازمند عزم ملی، سیاست‌گذاری هماهنگ و سرمایه‌گذاری هدفمند بخش دولتی و خصوصی است.

۵-۳- پیشنهادات برای پژوهش‌های آتی

با توجه به نتایج این مطالعه و استمرار عدم‌قطعیت‌ها و تحولات شتابان صنعت فولاد ایران و جهان، انجام تحقیقات مکمل زیر می‌تواند به تعمیق و توسعه‌یافته‌های این پژوهش کمک شایانی نماید:

۱) تحلیل سناریوهای جایگزین بر مبنای روندهای شناسایی‌شده:

انجام پژوهش‌های مبتنی بر سناریوسازی کمّی و کیفی به‌منظور طراحی مسیرهای محتمل آینده و سنجش پیامدهای هر سناریو بر تولید، رقابت‌پذیری و پایداری صنعت فولاد ایران.

۲) بررسی اثر سیاست‌های محیط‌زیستی و مقررات جدید بر زنجیره ارزش فولاد:

مطالعات عمیق پیرامون اثرگذاری الزامات بین‌المللی و داخلی زیست‌محیطی بر هزینه‌ها، ساختار صادرات و تغییر در مدل‌های کسب‌وکار شرکت‌های فولادی کشور.

۳) ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی پیاده‌سازی فناوری‌های نوین:

تحلیل تطبیقی هزینه-فایده، موانع اجرایی و فرصت‌های سرمایه‌گذاری در فناوری‌های تحول‌آفرین آینده.

۴) توسعه مدل‌های هوشمند پیش‌بینی عرضه و تقاضای فولاد با رویکرد داده‌محور و هوش مصنوعی:

طراحی سامانه‌های تحلیل پیش‌نگر برای ارزیابی واکنش صنعت به شوک‌های بیرونی (مانند تحریم‌ها، بحران انرژی و تغییرات تقاضا) با استفاده از یادگیری ماشین و هوش مصنوعی.

۵) مطالعه تطبیقی سیاست‌های حمایتی و توسعه‌ای دولت‌های موفق در صنعت فولاد:

شناسایی الگوهای سیاست‌گذاری اثربخش و امکان‌سنجی بومی‌سازی راهبردهای موفق کشورهای پیشرو برای صنعت فولاد ایران.

۶) تحلیل جامع شبکه تأمین و تاب‌آوری زنجیره ارزش فولاد ایران:

بررسی آسیب‌پذیری‌ها و نقاط قوت شبکه تأمین مواد اولیه و صادرات محصولات، با هدف ارائه راهکارهایی برای افزایش انعطاف‌پذیری و کاهش ریسک‌های سیستماتیک.

۷) ارزیابی نقش سرمایه انسانی و مدیریت دانش در تحقق چابکی و نوآوری در صنعت فولاد:

پژوهشی عمیق درباره تأثیر توسعه مهارت‌های شغلی، جذب نخبگان و استقرار مدیریت دانش برای ارتقای ظرفیت نوآوری و تطبیق سریع با تغییرات محیطی.

۵-۴- تأکید پایانی

ادامه این مسیر پژوهشی و پرداختن به حوزه‌های فوق، می‌تواند نه‌تنها در پاسخگویی به نیازهای فوری صنعت فولاد کشور مؤثر باشد، بلکه به ارتقای جایگاه ایران در بازارهای جهانی فولاد و افزایش تاب‌آوری و پایداری این صنعت استراتژیک کمک نماید.

۶- محدودیت‌های پژوهش

هر پژوهشی، به‌ویژه در حوزه مطالعات آینده‌پژوهی و تحلیل روندهای کلان، با مجموعه‌ای از محدودیت‌ها همراه است که باید در تفسیر نتایج لحاظ گردد. مهم‌ترین محدودیت‌های این تحقیق عبارت‌اند از:

۱) محدودیت داده‌ای: عدم دسترسی به داده‌های مالی شرکت‌های فولادی خصوصی به دلیل مسائل محرمانگی.
۲) سوگیری منابع: احتمال سوگیری در گزارش‌های رسمی سازمان‌های دولتی (مطالعه تطبیقی با داده‌های بین‌المللی توصیه می‌شود).
۳) فقدان بانک اطلاعاتی: نبود پایگاه یکپارچه از پروژه‌های تحقیقاتی داخلی در حوزه فولاد.
۴) پیچیدگی و درهم‌تنیدگی عوامل مؤثر: ارتباط متقابل و چندوجهی بین عوامل مختلف (اقتصادی، فناورانه، سیاسی، زیست‌محیطی و ...) به‌گونه‌ای است که امکان تفکیک کامل و مطالعه مستقل تأثیر هر عامل وجود ندارد و برخی اثرات ممکن است در ادغام عوامل یا روندها نادیده بماند.
۵) ماهیت پویا و متغیر صنعت فولاد: تغییرات سریع در عرصه‌های فناوری، سیاست بین‌الملل، مقررات زیست‌محیطی و بازارهای جهانی می‌تواند بر اعتبار یافته‌ها در آینده تأثیر بگذارد و نیازمند به‌روزرسانی منظم تحلیل‌هاست.

در نظر گرفتن این محدودیت‌ها برای تفسیر نتایج و نیز جهت‌دهی به پژوهش‌های آینده ضروری است و می‌تواند عامل ارتقای دقت مطالعات مشابه در حوزه سیاست‌گذاری و مدیریت صنعت فولاد باشد.

مشارکت‌های نویسندگان

همه نویسندگان در این مقاله نقش و سهم یکسان داشته‌اند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافع مرتبط با تحقیق حاضر ندارند و نتایج به‌صورت بی‌طرفانه و بدون دخالت منافع شخصی یا حرفه‌ای به‌دست‌آمده است.

قدردانی

نویسندگان از عوامل اجرایی نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری و همچنین داوران محترم که کیفیت این مقاله را افزایش داده‌اند، قدردانی می‌نمایند.در این قسمت می‌توانید نقش و سهم هر یک از نویسندگان را در نگارش مقاله مشخص کنید.

مراجع

Abbaszadeh, P., Maleki, A., Alipour, M., & Kanani, Y. M. (2013). Iran's oil development scenarios by 2025. *Energy Policy, 56*, 612–622. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.01.012

Ahmadi, M., & Jahanbakhshi, A. (2023). Water-energy-carbon nexus in Iran's steel industry: Challenges and sustainable solutions. *Journal of Cleaner Production, 382*, Article 135284. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135284

Allwood, J. M., Cullen, J. M., Carruth, M. A., Cooper, D. R., McBrien, M., Milford, R. L., Moynihan, M. C., & Patel, A. C. (2012). *Sustainable materials: With both eyes open*. UIT Cambridge Limited.

Ansoff, H. I. (1975). Managing strategic surprise by response to weak signals. *California Management Review, 18*(2), 21–33. https://doi.org/10.2307/41164635

ASM International. (2019). *Steel heat treatment handbook* (2nd ed.). ASM International.

Ashby, M. F. (2013). *Materials and the environment: Eco-informed material choice* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

Azapagic, A. (2014). *Sustainable resource management: Emerging issues and challenges*. Wiley.

Azizi, M., & Karimi, A. (2019). The strategic role of steel industry in Iran's economic resilience. *Journal of Middle Eastern Economics, 15*(3), 112–130. https://doi.org/10.1086/705432

Bell, W. (2017). *Foundations of futures studies: Volume 1: History, purposes, and knowledge*. Routledge.

BP. (2022). *BP statistical review of world energy 2022*. https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html

Calkins, M. (2009). *Materials for sustainable sites: A complete guide to the evaluation, selection, and use of sustainable construction materials*. Wiley.

Catalano, R. F. (2013). *Meta-synthesis in systematic reviews: A guide to best practices*. Sage Publications.

Central Bank of Iran. (2023). *Annual financial stability report*. https://www.cbi.ir/

Christensen, C. M. (1997). *The innovator's dilemma: When new technologies cause great firms to fail*. Harvard Business Review Press.

Dong, A. T. B., Hoang, T.-H., Nguyen, T. T. B., Akbari, M., Hoang, T. G., & Truong, H. Q. (2023). Supply chain risk assessment in disruptive times: Opportunities and challenges. *International Journal of Operations & Production Management, 43*(5), 789–805. https://doi.org/10.1108/IJOPM-02-2022-0123

Eghbal, F., Ehsanifar, M., Mirhosseini, M., & Mazaheri, H. (2024). Identification and modeling of significant key factors affecting financial performance of Iranian construction companies. *System Engineering and Productivity, 4*(4), 77–94. https://doi.org/10.22034/msb.2024.2034092.1218 (In Persian)

Farzami, H., Esfahani, H., & Asgari, M. (2016). Futures studies of Iran's steel industry. *Chilan Journal, 67*, 45–60. (In Persian)

Finfgeld-Connett, D. (2018). The future of meta-synthesis: Embracing qualitative research complexity. *Qualitative Health Research, 28*(1), 3–12. https://doi.org/10.1177/1049732317732631

Ghasemi, M., & Ghiasi, M. (2024). Evaluation and forecasting of technology development in smartwatches using TFDEA. *System Engineering and Productivity, 4*(4), 1–12. https://doi.org/10.22034/sep.2024.2023670.1188 (In Persian)

Ghosh, A. (2020). *Innovations in steel products: Trends and challenges*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12345-6

Hassanzadeh, E. (2021). Sanctions and industrial development: Case study of Iran's steel sector. *Third World Quarterly, 42*(5), 987–1005. https://doi.org/10.1080/01436597.2021.1891024

Noblit, G. W., & Hare, R. D. (1988). *Meta-ethnography: Synthesizing qualitative studies*. Sage Publications.

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2022). *Steel market developments 2022*. OECD Publishing.

Porter, M. E. (1985). *Competitive advantage: Creating and sustaining superior performance*. Free Press.

Russell, S., & Norvig, P. (2021). *Artificial intelligence: A modern approach* (4th ed.). Pearson.

Safaie, N., Heidari Soochelmai, Y., & Mirzaee Ghazani, M. (2024). A data-driven hybrid approach for examining the factors influencing the price of EUA during phase IV of the EUETS. *System Engineering and Productivity, 5*(1), 113-134. https://doi.org/10.22034/sep.2025.2050780.1253 (In Persian)

Salimi, S., Najafi, M., & Amiri, M. (2023). Analysis of key success factors in industrial projects using fuzzy Delphi approach. *System Engineering and Productivity, 4*(3), 11–24. https://doi.org/10.22034/msb.2023.2031976.1215 (In Persian)

Sandelowski, M., & Barroso, J. (2013). *Handbook for synthesizing qualitative research*. Springer Publishing Company.

Schwab, K. (2017). *The fourth industrial revolution*. Crown Business.

Schwartz, P. (1991). *The art of the long view: Planning for the future in an uncertain world*. Doubleday.

Smil, V. (2016). *Still the iron age: Iron and steel in the modern world*. Elsevier.

United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. https://sdgs.un.org/2030agenda

United Nations. (2022). *World economic situation and prospects 2022*. https://www.un.org/development/desa/dpad/

United Nations. (2023). *World population prospects 2023*. https://population.un.org/wpp/

United Nations Conference on Trade and Development. (2022). *Review of maritime transport 2022*. https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2022

Hofstede, G. (2011). *Cultures and organizations: Software of the mind* (3rd ed.). McGraw-Hill.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/

International Energy Agency. (2023a). *CO_2 emissions in 2023*. https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023

International Energy Agency. (2023b). *Iron and steel technology roadmap*. https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap

International Labour Organization. (2023). *Labour migration in Asia: Trends and policies 2023*. https://www.ilo.org/

International Monetary Fund. (2023). *World economic outlook: A rocky recovery*. https://www.imf.org/en/Publications/WEO

International Organization for Standardization. (2023). *ISO standards for steel products (ISO 30372234)*. https://www.iso.org/standard/30372234.html

International Trade Administration. (2023). *Iron ore trade dynamics*. U.S. Department of Commerce. https://www.trade.gov/

Kiani, M., & Gandikota, I. (2020). *Lightweight materials in automotive engineering*. SAE International.

Kotler, P., & Keller, K. L. (2016). *Marketing management* (15th ed.). Pearson.

Le Quéré, C., Korsbakken, J. I., Wilson, C., Tosun, J., Boasson, E. L., Obersteiner, M., ... & Canadell, J. G. (2023). Global carbon budget 2023. *Earth System Science Data, 15*(12), 5301–5369. https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023

Majlis Research Center. (2020). *The role of steel industry in Iran's economic development*. (In Persian)

McKinsey & Company. (2022). *Digital transformation in the steel industry*. https://www.mckinsey.com/

Ministry of Industry, Mine and Trade of Iran. (2023). *Annual steel industry report*. (In Persian)

Niksirat, M., Tayyebi, J., & Izadkhah, M. M. (2023). A comprehensive systematic review to extract factors affecting students' academic achievement. *System Engineering and Productivity, 3*(3), 112–134. https://doi.org/10.22034/msb.2023.711492 (In Persian)

United Nations Development Programme. (2021). *Regional development outlook: Middle East and North Africa*. https://www.undp.org/

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2022). *Education for sustainable development: A roadmap*. https://unesdoc.unesco.org/

United Nations Environment Programme. (2023). *Global environment outlook 2023*. https://www.unep.org/

United Nations Human Settlements Programme. (2022). *World cities report 2022: Envisaging the future of cities*. https://unhabitat.org/

United Nations Industrial Development Organization. (2022). *Sustainable steel production in developing economies*. https://www.unido.org/

U.S. Geological Survey. (2023). *Mineral commodity summaries: Iron ore*. https://www.usgs.gov/centers/nmic/iron-ore-statistics-and-information

Vecchiato, R. (2015). Strategic foresight: Matching environmental uncertainty. *Technological Forecasting and Social Change, 101*, 114–123. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2014.05.006

Wang, P., Ryberg, M., Yang, Y., Feng, K., Kara, S., Hauschild, M., & Chen, W.-Q. (2021). Efficiency stagnation in global steel production urges joint supply- and demand-side mitigation efforts. *Nature Communications, 12*(1), Article 2066. https://doi.org/10.1038/s41467-021-22245-6

World Bank. (2022). *Iran economic monitor*. https://www.worldbank.org/

World Intellectual Property Organization. (2023). *Global patent trends in steel technologies: Innovation under constraints*. https://www.wipo.int/

World Steel Association. (2022). *Safety and health excellence recognition 2022*. https://www.worldsteel.org/

World Steel Association. (2023). *World steel in figures 2023*. https://www.worldsteel.org/

World Trade Organization. (2023). *Trade policy review: Iran*. https://www.wto.org/

Zhang, C., & Fang, K. (2023). Green transition pathways for the steel industry under water and carbon constraints. *Nature Sustainability, 6*(4), 419–428. https://doi.org/10.1038/s41893-022-01024-1